

Mustaisnevan tuulipuiston varjostusraportti
Kauhajoen kaupunki
T1 – T9

Raportti TT-2013-12-10
Laati: Erkki Haapanen, DI

Sisällysluettelo

Johdanto.....	3
Varjovälke, välke ja varjostus	3
Varjon esiintymismahdollisuudet	3
Varjostusalue	4
Varjon kesto aika	5
Varjostuksen laskenta.....	7
Laskennan lähtöaineistot	7
Lapa auringon edessä	8
Laskennan kulku	10
Tulokset	10
Yhteenveto	14

Johdanto

Tämän raportin tarkoituksena on arvioida tuulipuiston potkureiden aiheuttaman varjon leviämisaluetta sekä varjostuksen esiintymisaikoja ja kestoja. Modernin voimalan varjo liikkuu hitaasti verrattuna 90-luvun alun voimaloihin, jolloin pyörimisnopeus oli alueella 30 – 50 kierrosta minuutissa ja kolmilapaisesta voimalasta varjo kulki katsojan ohi 90 – 150 kertaa minuutissa eli yksi – kaksi kertaa sekunnissa. Nykyiset megawattien kokoisten voimaloiden varjot liikkuvat 7 – 15 kierrosta minuutissa, jolloin varjojen väli on jo merkittävästi pitempi ja varjon liike rauhallinen. Isommassa voimalassa varjot ovat kauempana mutta kestoiltaan lyhytaikaisempia kuin aiemmin.

Varjovälke, välke ja varjostus

Tässä raportissa selvitetään tuulivoimalan potkurin lapojen pyörimisliikkeen aiheuttamaa liikkuvaa varjoa, josta käytän lyhyempää ilmausta **varjostus**. Samasta ilmiöstä käytetään usein harhaanjohtavasti sanoja ”varjovälke” tai ”välke”, jotka itse asiassa tarkoittavat eri asiaa.

”Välke” olisi oikea sana, jos puhuttaisiin lapojen aiheuttamasta välkkeestä samassa merkityksessä kuin ”heijastus” tai ”välkkeen” synonyymi ”kiilto”. Jos aurinko paistaa sopivassa kulmassa ja voimalan potkuri on näkyvissä, välkkyminen eli auringon valon heijastus lavan pinnalta näkyy kaikista suunnista ja etäisyyksiltä.

Tuulivoimaloiden kehityksen alkuvaiheessa lavat saatettiin maalata kiiltävillä vaaleilla tai valkoisilla¹ maaleilla, koska siten lavat pysyivät puhtaampina ja olivat aerodynaamisesti tehokkaampia. Lapojen kiiltävät pinnat aiheuttivat auringon paisteessa välkkeitä, mikä koettiin ikäväksi ilmiöksi ja siksi välkkymisen vähentämiseksi tuulivoimaloiden lapojen pintaväriyksiä vaadittiin mattapintaa, joka ei aiheuta välkkymistä. ”Välke” – sana on ehkä jäänyt tältä aikakaudelta mieleen ja käyttöön.

Varjon esiintymismahdollisuudet

Monet tekijät vaikuttavat varjostuksen esiintymiseen ja siksi varjostuksen haitallisuutta arvioitaessa on huomioitava, milloin varjostusta esiintyy ja miten se milloinkin vaikuttaa. Seuraavassa esimerkkejä:

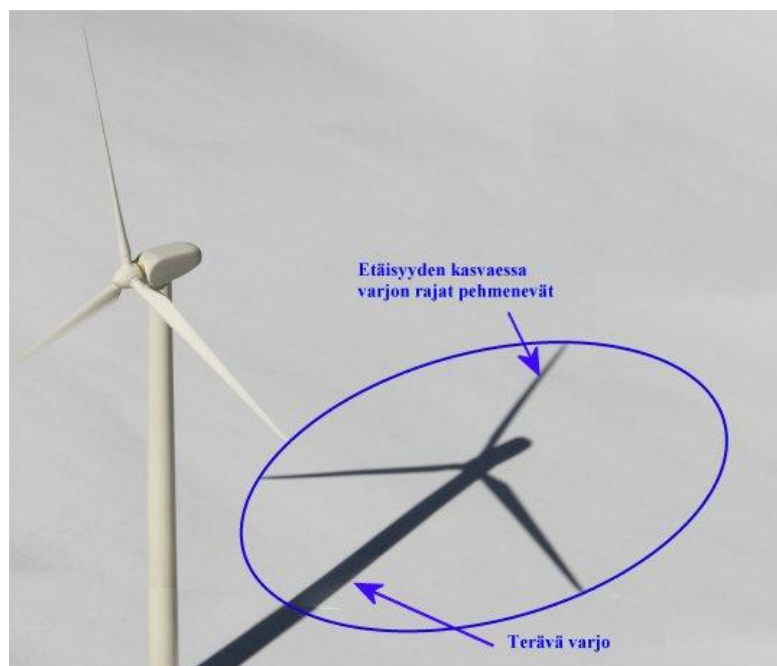
- auringon on oltava taivaanrannan yläpuolella
- sään on oltava kirkas – utu, sumu tai pilvet hajottavat auringon valoa ja pehmentävät varjoa tai estävät sen muodostumisen
- voimalan turbiinin on oltava käynnissä ja sijaittava auringon ja katsojan välissä. Yleensä minimi tuulen nopeus on 3 – 5 m/s, jotta turbiini pyörisi.
- tuulen suunnan on oltava sellainen, että katsojan sijaintipaikkaan syntyy varjo (potkurin suunta riippuu tuulen suunnasta)

¹ Valkoinen tai vaalea väri estää lavan pinnan ylikuumenemisen auringon paisteessa ja on siksi välttämätön, kun käytetään komposiittilapoja. Esimerkiksi Tanskassa on joissakin maakunnissa määritelty voimalan väriyksiä ”NAVY-GREY”, joka on mattaharmaa. Tarkoituksena on vähentää voimalan näkyvyyttä kirkkaalla kelillä.

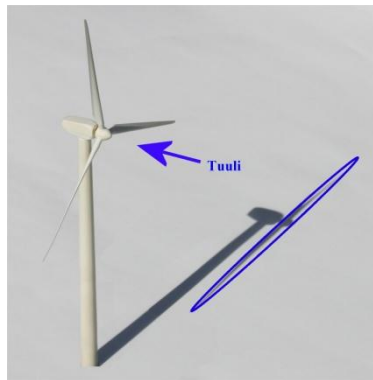
Saksassa on ollut oikeustapausta, jossa varjosta kärsivä oli haastanut voimalan rakentajan oikeuteen. Tuomioistuimen päätöksen mukaan 30 tuntia vuodessa todella koettua varjostusta on kohtuullinen yläraja. Päätöksessä otettiin huomioon varjostuksen esiintymisajankohdat sekä asianosaisen todellinen paikallaolo silloin, kun varjoa esiintyi.

Varjostusalue

Tuulivoimalanpotkurin jättämä varjo on se, josta ollaan kiinnostuneita. Varjoalue on vaakasuoralla pinnalla ellipsin muotoinen. Katsoja, joka on varjoalueella kohtaa varjon lavan kärjen piirtämän elliptisen alueen sisällä.



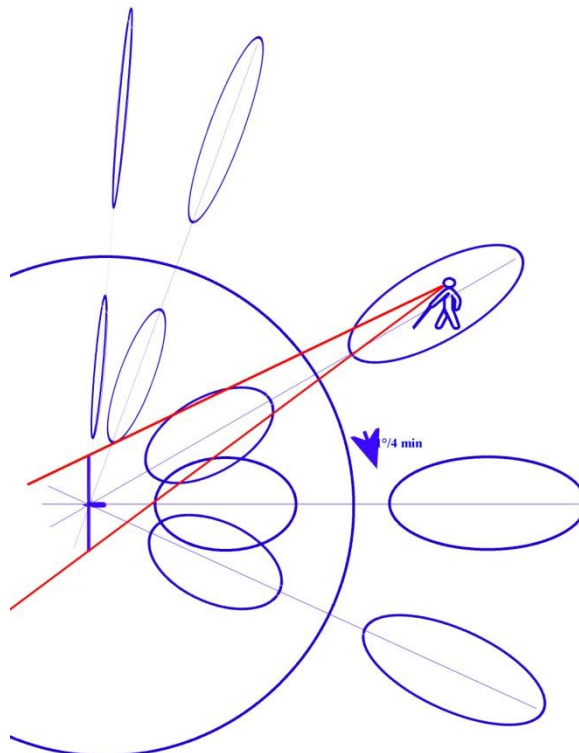
Kuva 1. Varjostusalue on sitä lähempänä voimalaa mitä korkeammalla aurinko on. Koska nykyaikaisen voimalan lavat ovat kärjestä hyvin kapeita eikä aurinko ole pistemäinen, lavan varjo pehmenee etäisyyden kasvaessa, koska lapa ei kykene enää peittämään aurinkoa kokonaan.



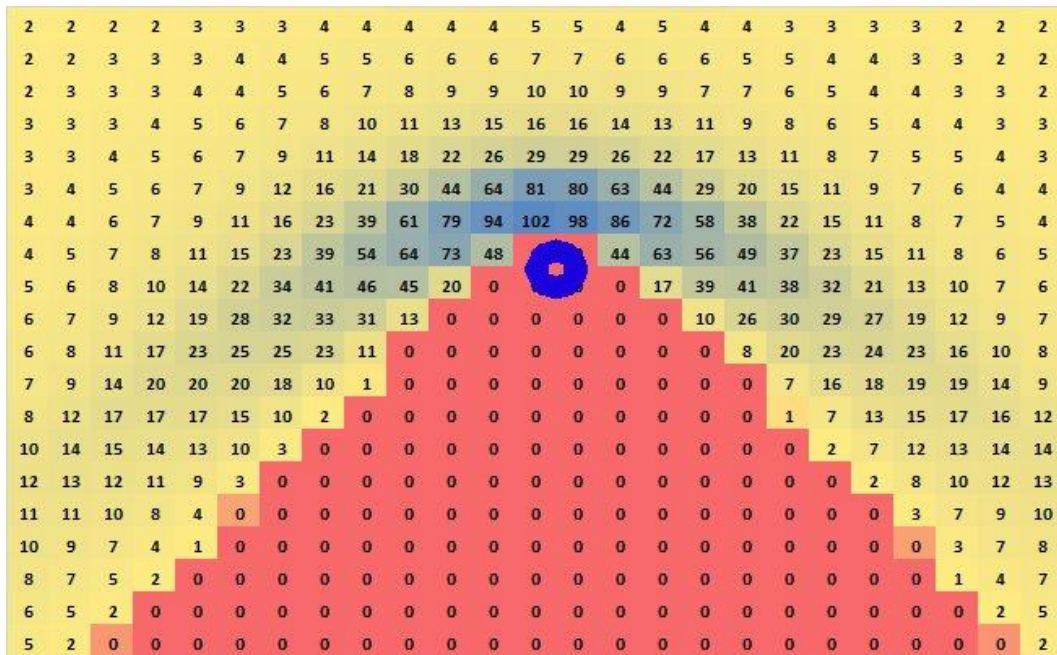
Kuva 2. Tuulen suunta vaikuttaa varjoalueen kokoon. Kun tuulee sivusta, niin varjo on pelkkä viiva. Varjon leveys vaikuttaa yhtenä varjostuksen kesto aikaan.

Varjon kesto aika

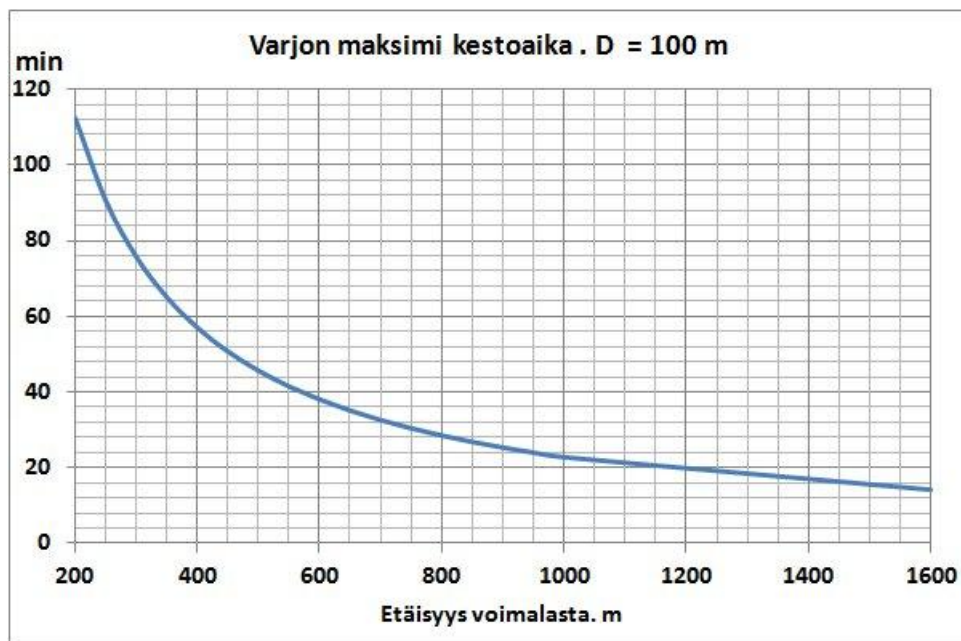
Maa kiertää akselinsa ympäri kerran vuorokaudessa tasaisella nopeudella, joka on 360° vuorokaudessa. Tästä saadaan kulmanopeudeksi $360^\circ/1440\text{min} = 0,25^\circ/\text{min}$.



Kuva 3. Varjon leveys ja pituus riippuvat auringon korkeuskulmasta sekä potkurin asennosta. Mitä korkeampi voimala on ja mitä matalammalla aurinko, sitä pitemmälle varjo osuu. Varjoalueella oleva katsoja näkee varjon, jos lapa kulkee auringon yli. Auringon on siis osuttava katselukulman sisälle, jotta varjo osuisi katsojaan. Varjo etenee yhden asteen neljässä minuutissa. Mitä kauempana voimalasta ollaan sitä lyhyemmäksi jää varjostusaika. Varjon leveys on suurimmillaan potkurin halkaisija mutta kapenee sitä enemmän mitä kapeampana katsoja näkee potkurin pyörintäkehän.



Kuva 4. Yhden voimalan vuotuiset varjostustunnit. Yksi ruutu on 50 x 50 m. Sininen väri kuvastaa runsasta varjostusta, punaisella alueella varjostusta ei esiinny, koska aurinko ei paista pohjoisesta eikä varjoa synny ennen auringon nousua.



Kuva 5. Varjon maksimikesto aika eri etäisyyksillä voimalasta. Maksimikesto aika edellyttää, että aurinko kulkee potkurin keskipisteen kautta ja että tulee suoraan auringon suunnasta tai kohti aurinkoa.

Varjostuksen laskenta

Laskennan lähtöaineistot

Varjon paikkaa laskettaessa on tunnettava auringon asema taivaalla. Tässä laskelmassa on käytetty 5 minuutin välein laskettua auringon asemaa, kompassisuuntaa sekä korkeutta.

Lähtöaineisto: <http://www.nrel.gov/midc/solpos/spa.html>.

Aurinkoisten tuntien lukumäärä vaihtelee paikkakunnittain. Ilmatieteenlaitos on julkaissut aurinkotuntien tilaston, jota on käytetty. Aurinkotunnit on laskettu kuukausittain.

kuukausi	Aurinkotunnit		Voimalan käyntitunnit auringonpaisteen aikana	
tammikuu	29	16 %	26	14 %
helmikuu	65	27 %	59	24 %
maaliskuu	133	37 %	120	33 %
huhtikuu	195	44 %	175	39 %
toukokuu	269	48 %	242	44 %
kesäkuu	287	48 %	258	43 %
heinäkuu	283	49 %	255	44 %
elokuu	219	44 %	197	40 %
syyskuu	136	35 %	122	32 %
lokakuu	81	27 %	73	24 %
marraskuu	31	15 %	28	14 %
joulukuu	19	13 %	17	11 %
	1747	39 %	1573	35 %

Taulukko 1. Vasemmalla aurinkotunnit ja niiden prosenttiosuus kuukauden kaikista tunteista. Oikealla voimalan käyntitunnit auringonpaisteen aikana ja niiden prosenttiosuudet kuukauden kaikista tunteista.

Tuulen voimakkuus ja suuntatiedot ovat saatavissa Ilmatieteenlaitoksen julkaisemasta Suomen tuuliatlaksesta 2,5 km välein koko Suomesta. Varjostus syntyy vain silloin, kun voimala on käynnissä eli tuulennopeus on 4 – 25 m/s. Potkuri suunnataan kohti tuulta, joten tuulen suuntatilastosta on laskettavissa, missä asennossa voimalan potkuri on katsojaan nähden. Tämä määrittelee, miten isona katsoja näkee potkurin pyörintäkehän. Laskennassa on yksinkertaistettu potkurin kokoa siten, että varjostusalueeksi on luettu suorakaide, jonka sivujen pituudet ovat katsojan suunnasta katsottuna potkurin kehän korkeus x leveys, jolloin saadut varjostusajat ovat hieman todellista suurempia. Tuulen voimakkuus ja suunta otetaan huomioon kuukausitilastojen avulla.

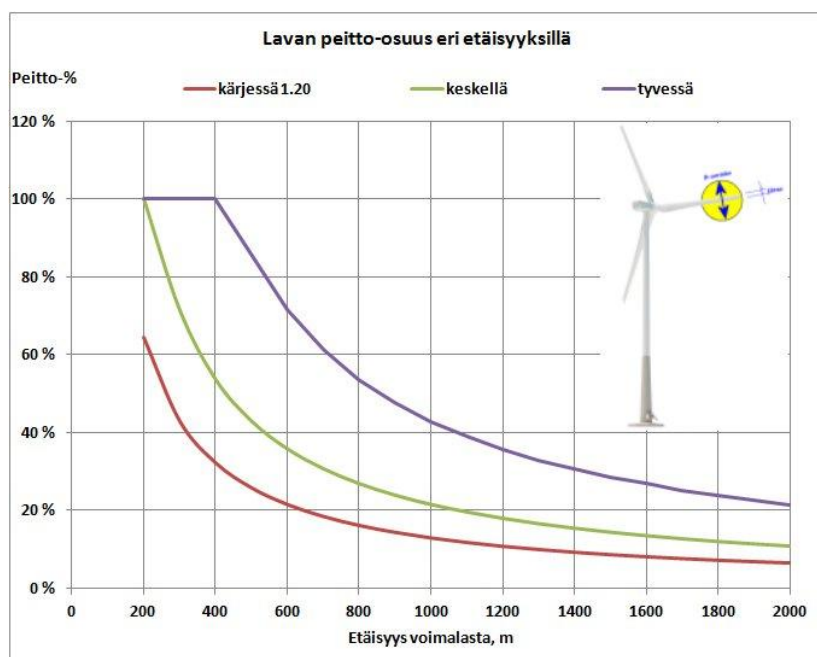
Maaston muodot vaikuttavat siihen, mihin varjo osuu. Kartta-aineiston avulla on muodostettu maastosta korkeuskäyrien avulla kolmiulotteinen kuva, jonka avulla voidaan määrittellä varjon paikka. Tässä tarkastelussa ei ole huomioitu metsän, rakennusten tai muiden erikoiskohteiden mahdollista vaikutusta vaan ne on tarkasteltava erikseen tuloksia tulkittaessa varsinkin lähirakennusten osalta.

Voimalan potkurin korkeus maan pinnasta eli napakorkeus sekä halkaisija vaikuttavat merkittävästi varjon paikkaan ja kestoan. Voimalan tehokäyrän avulla määritellään sen käyntiaika.

Tuulen suuntajakauma	
Sektori	Freq.
1	8.2
2	6.3
3	5.7
4	4.4
5	4.9
6	5.8
7	10.3
8	17
9	17.2
10	8.8
11	5.8
12	5.6

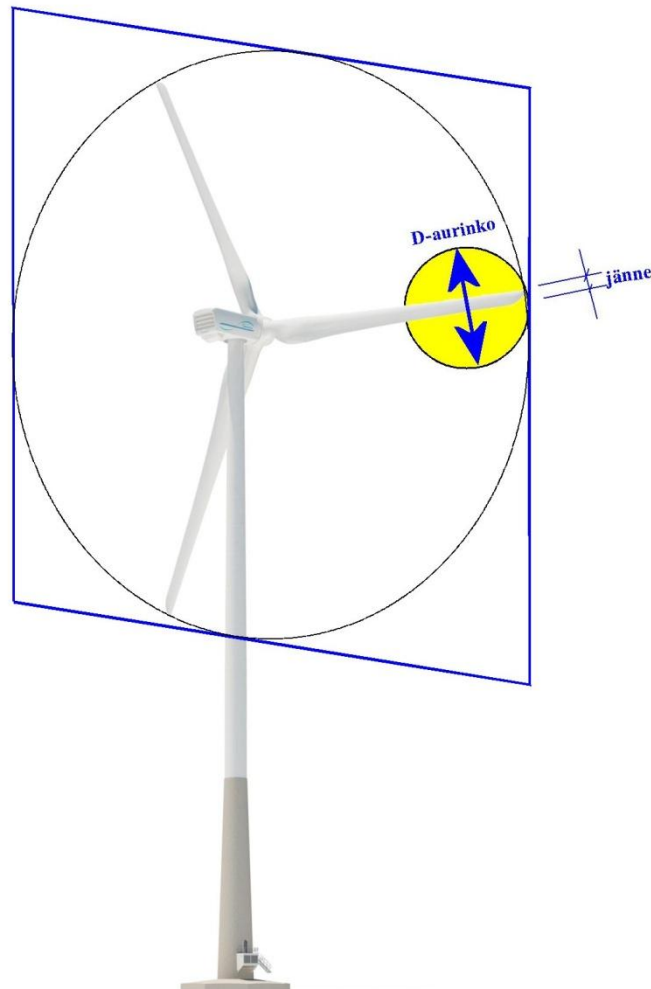
Taulukko 2. Tuulen suuntajakauma eri sektoreissa. Tämän mukaan määräytyy kulma, jossa katsoja näkee potkurin. Lisäksi tarvitaan auringon sekä katsojan koordinaatit.

Lapa auringon edessä



Kuva 6 Lavan kyky peittää aurinko riippuu etäisyydestä ja lavan leveydestä.

Auringon etäisyys maasta on 150 miljoonaa kilometriä ja halkaisija 1,4 Mkm. Auringon näennäinen leveys riippuu katsomisetaisyydestä viereisen kuvaajan esittä-mällä tavalla. Jotta tyvi kykenisi peittämään koko auringon, on katsojan oltava alle 400 m etäisyydellä. Kärki pystyy parhaimmillaan peittämään vain 64 % auringon leveydestä, jos etäisyys on 200 m ja vielä vähemmän etäisyyden kasvaessa. Tämä tarkoittaa heikkoa varjoa tai vain varjon häivettä.



Kuva 7. Auringon etäisyys maasta on 150 Gm ja halkaisija 1,4 Gm. Halkaisijan suhde etäisyyteen määrittelee auringon suhteellisen koon verrattuna välissä olevan tuulivoimalan lavan leveyteen. (1 Gm = miljoona kilometriä). Jos lapa ei peitä koko aurinkoa, ei varjoa synny vaan vaikutukseksi jää valoisuuden heikkeneminen muutaman sadasosasekunnin ajaksi lavan ohittaessa auringon.

Laskelmassa on oletettu auringon varjon syntyvän, kun aurinko leikkaa potkurin halkaisijan kokoisen suorakaiteen reunan tai on sen sisällä. Tämä liioittelee varjon esiintymistä potkurin ylä- ja ala-asennoissa, mutta antaa varmemman puolella olevan tuloksen. Suorakaide on sitä kapeampi mitä ohuemmalta lavan pyörimiskehä näyttää katsojan silmiin eli tuulen suunta määrittelee, miten kauan varjo näkyy kullakin kerralla. Tuulen suuntajakaumasta saadaan näkyvyyden suhteelliset osuudet.

Lapa peittää auringosta		Lavan leveys, m		
etäisyys m	D-aurinko m	kärjessä 1.20	keskellä 2.00	tyvässä 4.00
200	1.9	64 %	100 %	100 %
300	2.8	43 %	71 %	100 %
400	3.7	32 %	54 %	100 %
500	4.7	26 %	43 %	86 %
600	5.6	21 %	36 %	71 %
700	6.5	18 %	31 %	61 %
800	7.5	16 %	27 %	54 %
900	8.4	14 %	24 %	48 %
1000	9.3	13 %	21 %	43 %
1100	10.3	12 %	19 %	39 %
1200	11.2	11 %	18 %	36 %
1300	12.1	10 %	16 %	33 %
1400	13.1	9 %	15 %	31 %
1500	14.0	9 %	14 %	29 %
1600	14.9	8 %	13 %	27 %
1700	15.9	8 %	13 %	25 %
1800	16.8	7 %	12 %	24 %
1900	17.7	7 %	11 %	23 %
2000	18.7	6 %	11 %	21 %

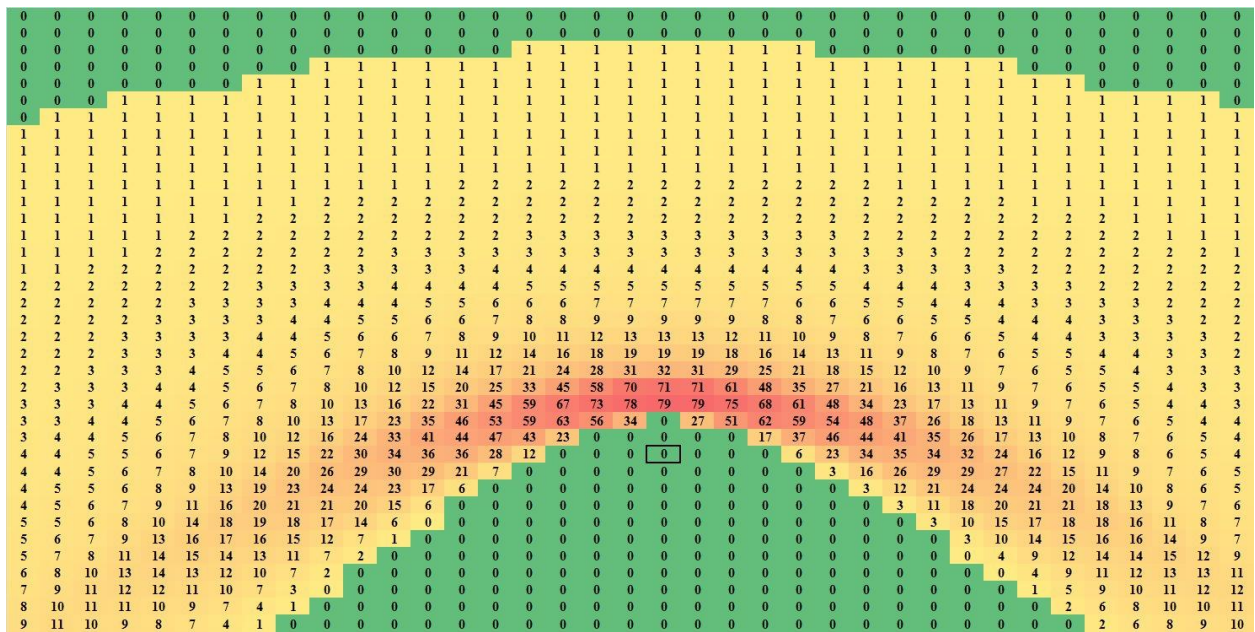
Taulukko 3. Lavan peittävyys eri etäisyyksillä voimalasta, jos voimala on kohti aurinkoa ja lapa näkyy leveimmillään. D-aurinko on auringon näennäinen halkaisija voimalan etäisyydeltä katsottuna. Jos lapa tällä etäisyydellä ei kykene peittämään aurinkoa, varjo heikkenee sitä enemmän mitä pienempi peittoprosentti on.

Laskennan kulku

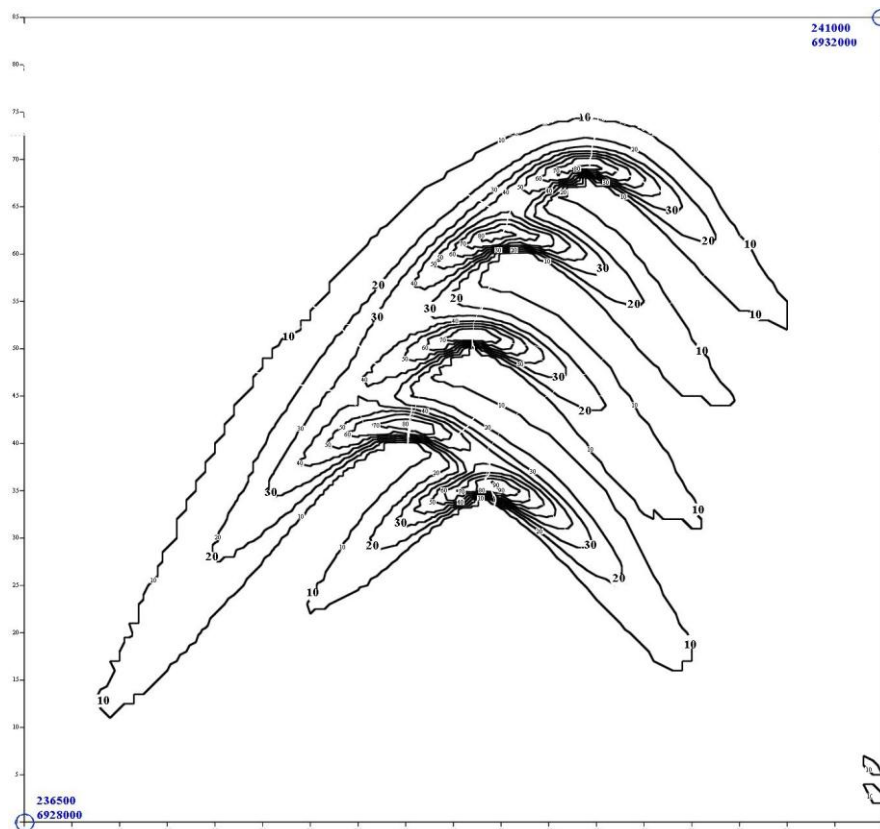
Laskenta suoritetaan 50 x 50 m välein koko varjostusalueelle. Useamman voimalan ollessa kyseessä laskenta suoritetaan jokaiselle voimalalle ja lasketaan kuhunkin pisteeseen tulevat varjostusajat yhteen. Kun koko alue on laskettu, tulokset esitetään graafisesti karttapohjalla varjostusvyöhykkeinä. Jos varjostusalueella on rakennuksia, niiden kohdalle osuvat varjostusajat voidaan laskea talokohtaisesti. Samalla voidaan myös laskea, mihin vuoden- ja kellonaikaan varjostus esiintyy ja kuinka kauan kerrallaan varjo kestää.

Tulokset

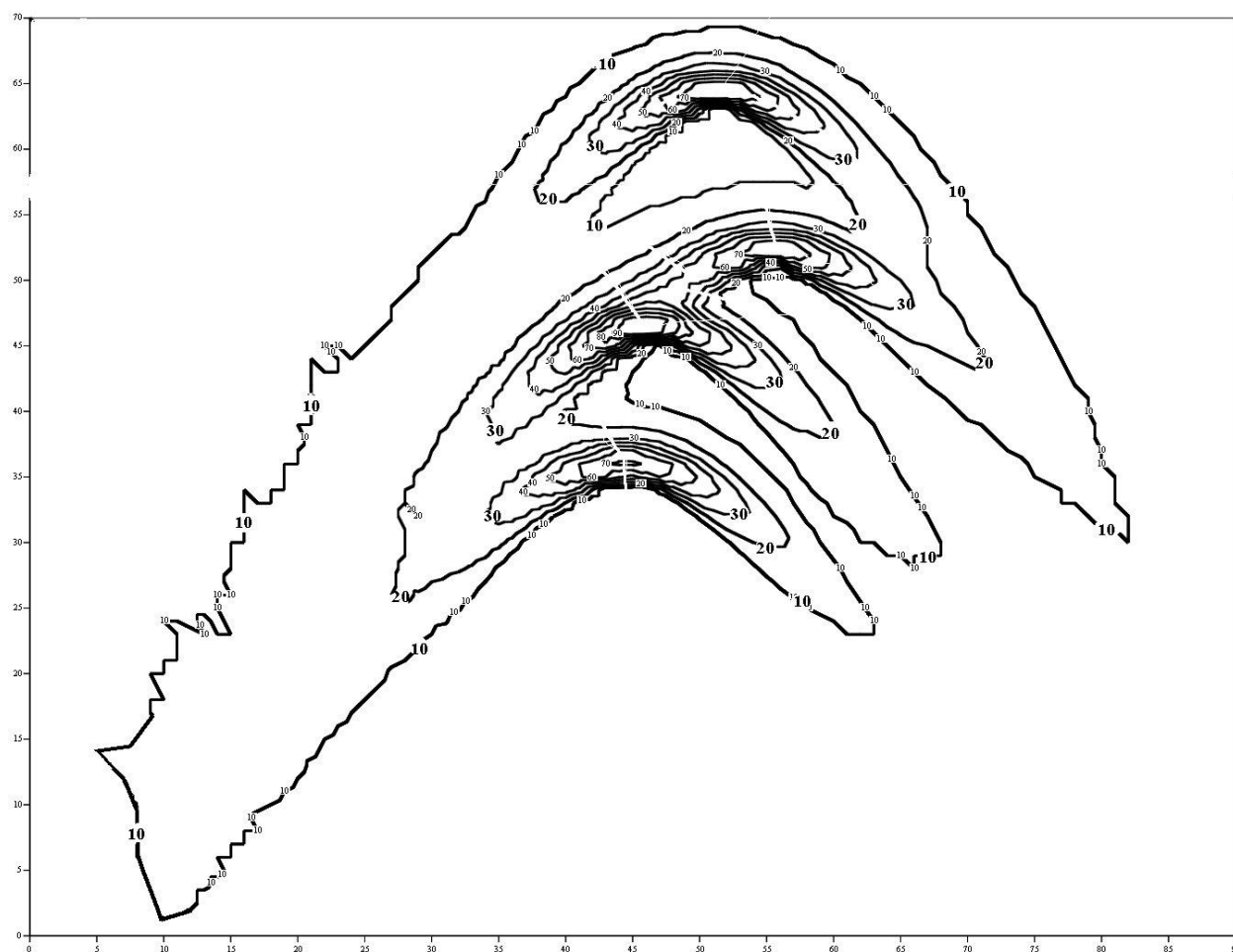
Seuraavassa kuvassa on esitetty excel-laskennan tulokset, joiden avulla on määriteltävissä kuhunkin 50x50m ruutuun kohdistuva vuotuinen varjostustuntimäärä. Väriskaala osoittaa visuaalisesti varjostusalueet. Kuvan avulla on tehty Mathcadillä varjostusalueiden rajat, jotka ovat seuraavissa kuvissa, jotka on asemoitu maastokartan päälle, jotta saadaan varjostusalueiden sijainti kartalla ja pystytään näkemään vaikutusalueet.



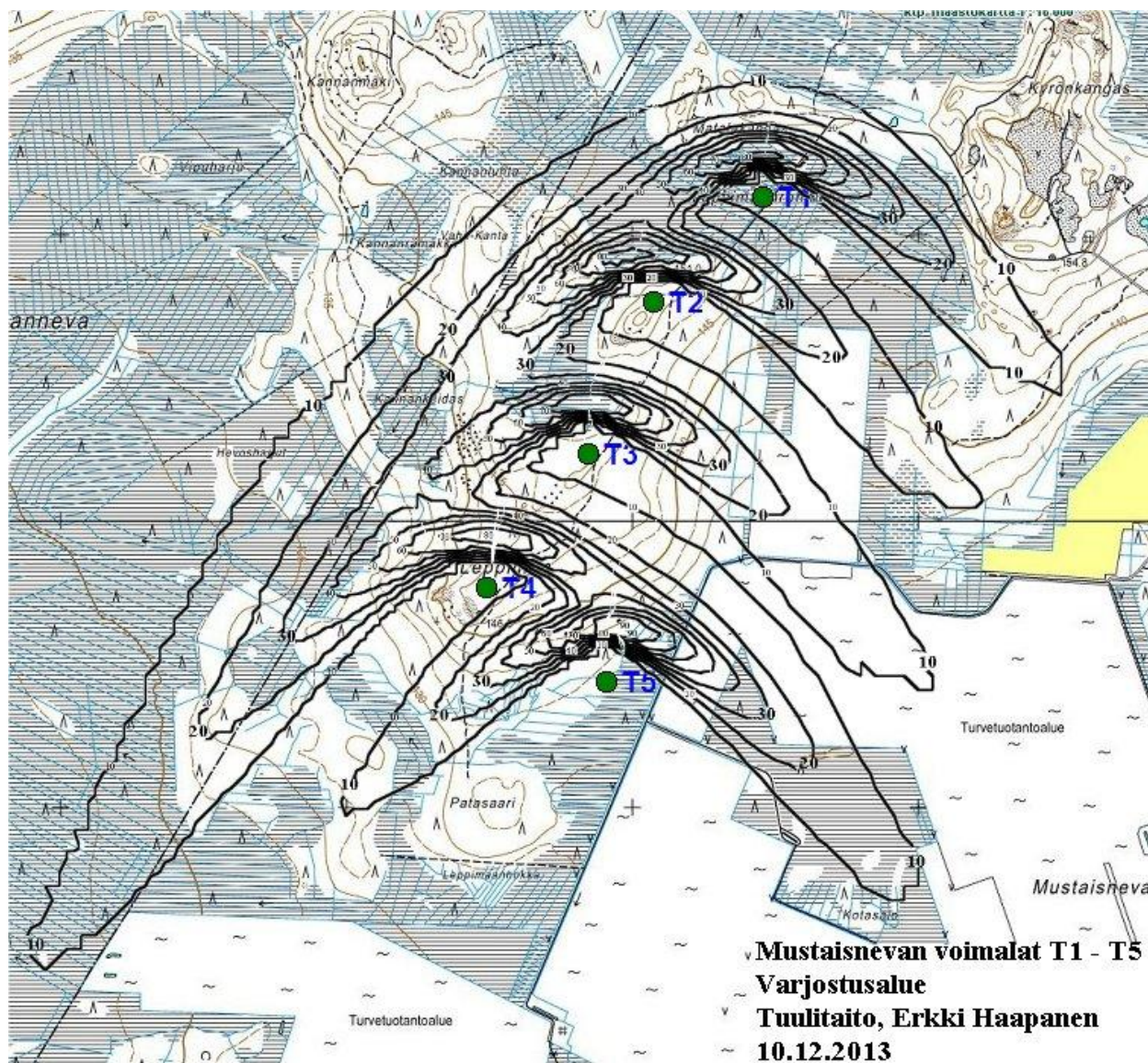
Kuva 8. Esimerkki varjostusten yhteisvaikutuksesta. Musta neliö edustaa voimalan sijaintia. Laskennassa ovat mukana ovat kaikki voimalat T1-T9. Värät ja lukuarvot osoittavat kuhunkin 50x50 m ruutuun kohdistuvat keskimääräiset vuotuiset varjostustunnit. Vihreä on vähän tai ei ollenkaan ja punainen paljon varjoa.



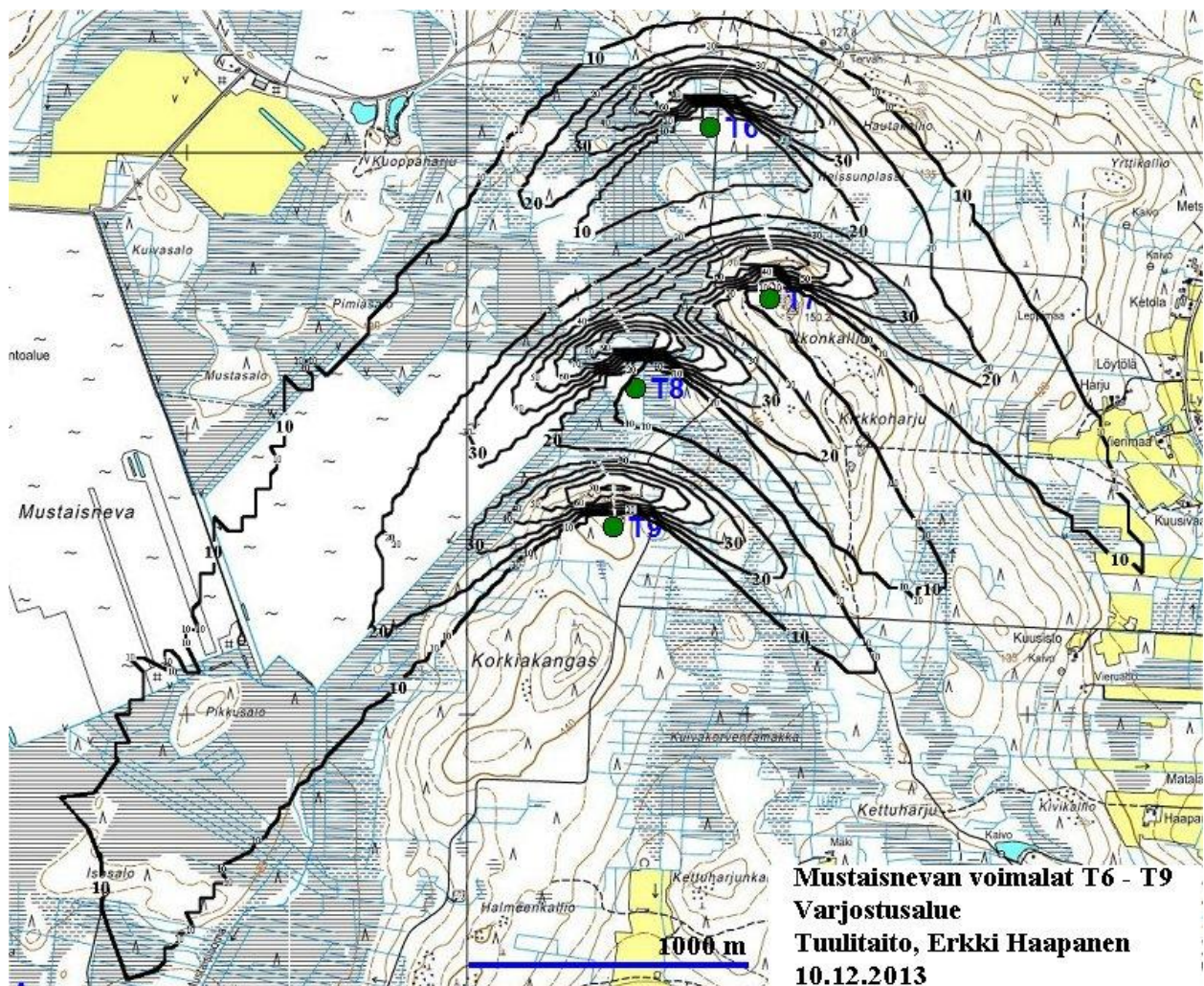
Kuva 9. Varjostuskuviot voimalaryhmiä T1 – T5. Aurinko nousee koillisesta-idästä ja varjostaa aamulla lounasta – länttä ja illalla päinvastoin.



Kuva 10 Varjostuskuviot voimalaryhmille T6 – T9. Leveä vasen haara, jossa varjostustunteja on 10, on osittain kaikkien neljän voimalan enemmän tai vähemmän varjostama.



Kuva 11. Varjostusalueet T1 – T5.



Kuva 12. Varjostusalue T6 – T9.

Yhteenveto

Varjostusalueella ei ole arkoja kohteita.